

Orán Cáceres, J.P., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): Una propuesta complementaria de análisis de sensibilidad de un modelo basado en técnicas SIG y evaluación multicriterio. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 971-987. ISBN: 978-84-472-1294-1

UNA PROPUESTA COMPLEMENTARIA DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE UN MODELO BASADO EN TÉCNICAS SIG Y EVALUACIÓN MULTICRITERIO

Juan Pablo Orán Cáceres¹, Montserrat Gómez Delgado¹, Joaquín Bosque Sendra¹

(1) Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. C/ Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares. juan.oran@uah.es; Montserrat.gomez@uah.es; joaquin.bosque@uah.es

RESUMEN

La utilización combinada de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las técnicas de Evaluación MultiCriterio (EMC) para la asignación óptima de usos del suelo ha sido amplia y eficazmente empleada en los últimos años. Sin embargo, siguen realizándose pocas y novedosas propuestas para intentar aportar algún grado de fiabilidad a los resultados obtenidos en este tipo de modelación espacial.

En esta comunicación se explora un análisis de sensibilidad (AS) para determinar la estabilidad de un modelo de crecimiento urbano desarrollado para la localización óptima de zonas residenciales, comerciales e industriales en la Comunidad de Madrid para el año 2000 (partiendo de los datos reales de 1990). Este análisis pretende determinar si la modelización de los factores implicados en el modelo puede influir de manera sustancial en la variación de los resultados del mismo. Para este fin se seleccionaron 4 factores de un total de 15 utilizados originalmente en la simulación del crecimiento urbano de la región, concretamente distancia a núcleos urbanos, distancia a carreteras, distancia a cursos de agua y usos del suelo. Se midió la variación entre cada factor modelizado y su respectivo en el modelo original, su repercusión en un estadio intermedio del proceso y las diferencias producidas en el resultado final. Para ello se ha optado por calcular la diferencia media por píxel entre los dos mapas y el índice Kappa, según se tratase de mapas cuantitativos o cualitativos, respectivamente. Los resultados muestran que esta metodología puede ser utilizada de forma sencilla para afianzar los resultados de un modelo espacial, aunque es necesario profundizar más en sus posibilidades.

Palabras Clave: Modelización del crecimiento urbano, Evaluación Multicriterio, Sistemas de Información Geográfica, Análisis de sensibilidad, Comunidad de Madrid.

ABSTRACT

Geographical Information Systems (GIS) and MultiCriteria Evaluation (MCE) have been efficiently applied in optimal location of land use. However, there are few new proposals in order to test the robustness of this spatial model results.

The aim of this study is to explore a complementary sensitivity analysis (SA) to determine the stability of a simulation model of urban growth in the region of Madrid. This simulation started from the land cover situation in 1990 and assigned new residential, industrial and commercial uses for 2000. The analysis proposed try to evaluate whether different ways of modelling the factors included in the model can introduce substantial variations on final results. To do so, it considered 4 factors from the 15 originally used in the model (distance to urban areas, distance to hidrology, land use and distance to roads). The impact of this modifications were evaluated on three steps of the model execution. The differences by pixel between original and modified maps and the Kappa index were used with cuantitative and cualitative maps, respectively. The results show this methodology could be a easy way to test the robustness of the model results but we have to go deep into its possibilities.

Key Words: Urban growth simulation, Multicriteria evaluation, Geographical Information Systems, Sensitivity analysis, Madrid region.

INTRODUCCIÓN

Es ya de sobra conocido el interés que el mundo científico ha mostrado siempre por la necesidad de llevar a cabo procesos de validación de los modelos desarrollados, no tanto con el objetivo de evaluar la investigación en sí, sino de proporcionar credibilidad a los resultados de los mismos en la comunidad de usuarios. Esta práctica se hace hoy más necesaria si se tiene en cuenta que, con los avances informáticos de los últimos tiempos, la carga computacional necesaria para ejecutarlos es menor, con lo que se tiende a elaborar modelos cada vez más sofisticados.

Llegados a este punto, como muy bien matiza E.J. Rykiel (1996), estos procesos de validación han de ser necesariamente distintos dependiendo del tipo de modelos. En el caso de modelos de simulación generados para la gestión práctica de necesidades industriales o de ingeniería, por ejemplo, es necesario certificar su capacidad operacional y, por tanto, es necesario aplicar procesos que verifiquen su capacidad de predicción. Sin embargo, en el ámbito de la ecología y de gran parte de las ciencias sociales, se desarrollan modelos de simulación con el objetivo de comprender un fenómeno determinado o corroborar ciertos aspectos teóricos. Así, en este contexto es más apropiado juzgar si un modelo es útil para el propósito para el que se desarrolló y no la exactitud de su aplicabilidad.

Dentro del ámbito que nos ocupa en este trabajo, de aplicación de modelos espaciales en un entorno SIG, hoy día encontramos ya numerosos trabajos que utilizan la combinación de éstos con las técnicas de EMC para la resolución de problemas de ordenación del territorio, concretamente para la localización de nuevas actividades/usos en aquellos lugares que mayor vocación presenten para albergarlos. Estos modelos espaciales, al igual que otros modelos (matemáticos, físicos,...), no están exentos de una cierta falta de confianza en los resultados si no se utilizan procedimientos adecuados para garantizar la robustez de los mismos, más si cabe cuando estas técnicas suelen ser criticadas por una inherente e inevitable carga de subjetividad en los planteamientos de las reglas de decisión (Lamelas Gracia, 2009).

Según Qureshi et al. (1999), el proceso de validación de cualquier modelo debería estar formado por tres componentes:

- a) Verificación de si el modelo está correctamente construido (desde el punto de vista formal).
- b) Validación de si la estructura del modelo representa adecuadamente el sistema modelado (si se ha construido el modelo correcto desde un punto de vista conceptual y operacional).
- c) Aplicación de un análisis de sensibilidad que permita comprobar la robustez y estabilidad del modelo, examinando la variación que se produce en los resultados cuando se realizan variaciones sistemáticas en un rango de interés sobre uno o varios parámetros de entrada.

El primer procedimiento se trata de una simple comprobación de que, desde el punto de vista formal, el modelo funciona correctamente. En cuanto a la verificación de si el modelo construido es el adecuado para representar el sistema estudiado (b), una de las prácticas más aconsejables es la utilización de datos históricos o de campo que permitan comprobar el grado de coincidencia de los resultados del modelo con datos del mundo real (Berger, 2001; Dumont y Hill, 2001). En nuestro caso esto se convierte en una práctica inviable, puesto que el objetivo no es realizar una predicción cierta sobre lo que va a ocurrir o debería haber

ocurrido, sino recrear hipotéticas situaciones óptimas que habitualmente no coinciden con lo que se ha producido en la realidad, pero que nos permiten comprobar el alcance y las posibles consecuencias de materializar unas formas de desarrollo territorial u otras y, en última instancia, actuar en consecuencia.

Por ello esta comunicación se centra en el tercer componente, el análisis de sensibilidad, que no suele ser todavía una práctica muy habitual. Una de las propuestas más comunes para determinar la estabilidad de estos modelos ha sido tradicionalmente un AS basado en la modificación de los pesos otorgados a los factores que intervienen en la EMC, que permitiera determinar el impacto que en los resultados pudieran producir esas variaciones (Gómez Delgado y Bosque Sendra, 2004). Más minoritarias son las propuestas relacionadas con los cambios de otros parámetros del modelo, como el tipo de distancia calculada en los métodos de EMC basados en el análisis de punto ideal, la modificación de la agregación de la información de las alternativas evaluadas (en zonas o píxeles), etc. (Baja et al., 2007; Chang et al., 2008; Geneletti y van Duren, 2008). No obstante, podemos concluir que desde la revisión realizada por M. Gómez Delgado y J. Bosque Sendra (2004), la tendencia ha sido prácticamente la misma, con pocas propuestas novedosas.

Una de las metodologías ensayadas en los últimos tiempos ha sido la aplicación de los análisis utilizados habitualmente en la modelización numérica (screening, locales o globales) a este tipo de modelos basados en EMC (Saltelli et al. 2000). A. Saltelli (1999a), recomienda los análisis de tipo global, pues tienen la ventaja de poder abarcar todo el recorrido de las variables que participan en el modelo y además se puede analizar el impacto de todas ellas de manera conjunta. De hecho, encontramos varios trabajos en los que se ha aplicado con éxito este tipo de análisis a modelos espaciales (Crosetto y Tarantola, 2001; Crosetto et al. 2001; Crosetto et al., 2002; Gómez Delgado y Tarantola, 2006). Sin embargo, también se ha demostrado que su aplicación en modelos espaciales es limitada, pues estos análisis no han sido desarrollados para tratar con variables espacialmente distribuidas, por lo que esta característica no resulta suficientemente explorada. Liburne y Tarantola (2009) realizan una reflexión en este sentido y proponen una mejora de la aplicación de estos análisis a partir de la utilización de métodos de extracción de muestras de las variables que forman parte del modelo, que recojan de una manera más explícita la variabilidad espacial de las mismas.

No obstante, este AS de estos modelos de tipo espacial pensamos que puede y debe ser explorada en otras facetas del modelo. Las características intrínsecas de un modelo basado en EMC, la gran cantidad y diversidad de variables que pueden ser tenidas en cuenta y las diferentes formas de modelar, puntuar y tratar muchas de ellas, pensamos hace necesario ensayar y proponer análisis complementarios que nos den algo más de información sobre la fiabilidad y estabilidad de los resultados del modelo.

Así, podríamos identificar hasta cinco niveles diferentes de AS del modelo:

- Análisis de la incidencia de la variación de los pesos otorgados a los distintos factores
- Análisis de la incidencia de la utilización de un método u otro de EMC
- Análisis de la incidencia de la modelación de los factores
- Análisis de la incidencia de las posibles correlaciones entre variables
- Análisis de la incidencia de las restricciones consideradas

Los dos primeros procedimientos son los que habitualmente se han venido tratando en la literatura especializada y que más frecuentemente se suelen aplicar en modelos de este tipo.

En el presente trabajo, se indaga en la tercera de las posibilidades citadas, siempre utilizando para ello las herramientas disponibles en cualquier SIG raster, de tal forma que el procedimiento no resulte difícil ni tedioso de aplicar y no requiera una excesiva carga computacional. Así, este primer ensayo está basado en la modificación de la forma en la que algunos de los factores han sido modelizados para su utilización en la EMC.

El modelo a analizar es una simulación del crecimiento urbano óptimo que podría haberse producido entre 1990 y el año 2000 (Plata et al., 2010). Para ello se utiliza un conjunto importante de factores biofísicos y socioeconómicos. De todos los factores utilizados en el modelo, se escogieron aquellos cuya modelización podría haber sido propuesta de una manera algo diferente y que tenían cierta relevancia en la asignación de las nuevas zonas urbanas. Concretamente se escogieron los factores *distancia a las carreteras*, *distancia a los núcleos urbanos*, *distancia a los ríos* y *usos de suelo*.

Para determinar la robustez de los resultados se midió la variación entre el resultado del modelo con cada uno de los factores modificados y el resultado del modelo original. Dicha evaluación se realizó en tres fases: una fase dónde se encuentra el factor propiamente dicho, otra fase dónde se genera el mapa de adecuación para

cada uso individual y en la modelización multiobjetivo conjunta para todos los usos. De esta forma se pretende comprobar si la incidencia de las diferencias resultantes a nivel de factor se propaga de manera lineal en los resultados intermedios y finales del modelo.

2. METODOLOGÍA Y DATOS

2.1. Modelo utilizado con técnicas EMC Y SIG.

El área de estudio dónde se ha probado el modelo objeto de análisis es la Comunidad de Madrid. Se trata de un área que ha experimentado un crecimiento considerable en las últimas décadas, siguiendo un patrón de carácter disperso y fragmentado. En el periodo estudiado, 1990 a 2000, las superficies artificiales han aumentado en un 50% respecto a la superficie total de la región de estudio. Si a este hecho le unimos que la población ha buscado fuera de las grandes urbes una vivienda asequible económicamente, y que los sistemas de transporte han mejorado notablemente, se produce cierta atomización observada en los espacios artificiales para la región de la Comunidad de Madrid (Plata et al., 2010).

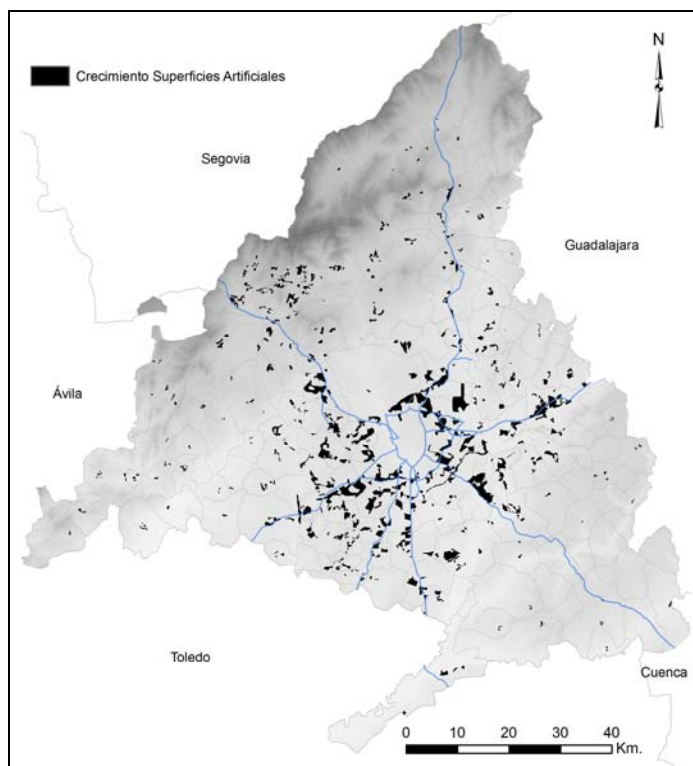


Figura 1. Crecimiento urbano en la Comunidad Autónoma de Madrid (1990-2000).

Fuente: adaptado de Plata et al. (2010)

Con el modelo desarrollado han sido localizadas las zonas con mayor vocación para ser urbanizadas en la región madrileña, teniendo en cuenta criterios ambientales y socioeconómicos. El modelo se encuentra descrito de manera detallada en el trabajo por Plata et al. (2010).

En el citado trabajo fueron recopiladas un conjunto de variables espaciales tomando como referencia la documentación existente sobre este tipo de estudios, pero, sobre todo, teniendo en cuenta la disponibilidad de información para la Comunidad de Madrid. En la tabla 1 aparecen los factores finalmente planteados a partir de las variables seleccionadas para el estudio. Finalmente se recopilaron datos referentes a usos del suelo (Corine Land Cover 1990 y 2000), tipos de suelo, hidrografía, carreteras (1991 y 1998), espacios naturales protegidos (Red Natura 2000), vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos, geotecnia, instalaciones no deseables, equipamientos, altitud, pendiente y orientación del terreno, población y delimitaciones administrativas. Dicha información se extrajo de diferentes fuentes, tales como: el Instituto

Geográfico Nacional, el Instituto Geológico y Minero, la Consejería de Agricultura y Servicio de Cartografía Regional de la Comunidad de Madrid, el Departamento de Estadística de la Consejería de Economía de la Comunidad de Madrid y el Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá de Henares, entre otras. La escala original de la información es, en general, 1:100.000; aunque en algunos casos se recurre a datos de escala mayor o menor. Toda la información fue tratada en formato raster en el SIG Idrisi Andes, utilizando un tamaño de píxel de 50 m. (Plata et al., 2010).

Tabla 1. Factores implicados en el modelo de simulación óptima de crecimiento urbano.

Elaborado por Plata et al. (2010) dentro del marco del proyecto SIMURBAN.

GRUPO	Factores	P.R.	P. C	P. I	P. Final R.	P. Final C.	P. Final I.
Ambiental U = 0,34 C = 0,31 I = 0,54	Usos del suelo (CLC1990)	0,40	0,40	0,40	0,14	0,12	0,21
	Lejanía a hidrografía	0,19	0,19	0,19	0,07	0,06	0,10
	Vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos	0,08	0,08	0,08	0,03	0,02	0,04
	Lejanía a espacios naturales	0,14	0,14	0,14	0,05	0,04	0,08
	Protección de suelos de mayor productividad	0,19	0,19	0,19	0,07	0,06	0,10
Suma=1	Suma =	1,00	1,00	1,00			
Económico U = 0,46 C = 0,49 I = 0,30	Pendiente	0,05	0,05	0,08	0,02	0,02	0,02
	Accesibilidad a carreteras	0,26	0,35	0,36	0,12	0,17	0,11
	Accesibilidad a zonas urbana	0,36	0,29	0,26	0,16	0,14	0,08
	Accesibilidad a industrias y comercios	0,19	0,22	0,15	0,09	0,11	0,05
	Geotecnia	0,14	0,10	0,15	0,06	0,05	0,05
Suma=1	Suma =	1,00	1,00	1,00			
Social U = 0,20 C = 0,20	Lejanía a instalaciones no deseables	0,11	0,28	0,31	0,02	0,06	0,05
	Accesibilidad a	0,52	0,25	0,20	0,10	0,05	0,03

I = 0,16	hospitales						
	Distancia (ponderada) población		0,33	0,49		0,07	0,08
	Cuencas Visuales	0,07	0,08		0,02	0,02	
	Orientación del terreno	0,29	0,06		0,05	0,01	
Suma=1	Suma =	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

P.R.: Peso uso Residencial; P.C.: Peso uso Comercial; P.I.: Peso uso Industrial

Como ya se ha mencionado, el modelo normativo a partir del que se obtienen aquellas ubicaciones con mayor aptitud para ser utilizadas como suelo residencial, comercial e industrial se basa en la utilización de técnicas de EMC en un entorno SIG. En este modelo se ha empleado una de las técnicas más utilizadas en este tipo de estudios, la Sumatoria Lineal Ponderada (SLP). La determinación de los pesos de las variables en función de su importancia con respecto al resto, se realizó a partir del ya sobradamente conocido método de comparación por pares de Saaty (Gómez Delgado y Barredo, 2005).

La metodología seguida en el trabajo de modelado llevada a cabo en Plata *et al.* (2010) se resume en los siguientes puntos:

1. En primer lugar se realizó una selección de aquellos factores que pudiesen determinar mejor la aptitud del territorio para ser urbanizado. Una vez seleccionados estos, fue recopilada la información pertinente para un total de 15 factores de tipo ambiental, económico y social. Todos ellos fueron modelados en los términos que se consideraron más apropiados para el objetivo de estudio. Finalmente todos fueron normalizados en una escala que va del 0 al 255, aplicándose operadores borrosos lineales y sigmoidales. Posteriormente, se otorgó un peso a cada uno de los factores a partir de la matriz de comparación por pares de Saaty y su propuesta jerárquica. Así, en primer lugar, se ponderó cada grupo de factores en función del tipo de uso a localizar. Para el caso del uso residencial y comercial se otorgó mayor peso al grupo de factores económicos, mientras que para el uso industrial el grupo más relevante sería el de los factores ambientales. Una vez ponderado cada factor individualmente dentro de su grupo, se multiplicó su peso por el del grupo al que pertenecía, obteniendo así el peso final de cada uno de los factores (ver tabla 1).

2. Se generaron los mapas de aptitud a partir de la técnica de EMC, Sumatoria Lineal Ponderada, como se señaló anteriormente. Con esto se obtuvieron tres mapas: uso residencial, uso comercial y uso industrial. La ecuación utilizada para este paso fue (Gómez y Barredo, 2005):

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot v_{ij}$$

Donde:

r_i es el nivel de adecuación de la alternativa i

w_j es el peso del criterio j

v_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio j .

En este paso, cabe reseñar que se establecieron una serie de **restricciones** en aquellas áreas donde no se podían construir. Los espacios que fueron excluidos del análisis fueron: las zonas clasificadas como suelo no urbanizable de protección, los espacios naturales protegidos, también se consideraron como restricciones las superficies artificiales existentes en 1990, cuerpos de agua y la red hidrográfica.

3. Una vez obtenidos los mapas de aptitud, con valores de adecuación para cada parte del territorio (píxel) de 0 a 255, se obtuvo un mapa de las mejores parcelas que tuvieran una superficie mínima definida, a partir de la metodología diseñada por Franco y Bosque (1997). Este procedimiento permite paliar las deficiencias

presentadas cuando se trabaja con mapas de aptitud a nivel de píxel, entre ellas, patrones dispersos y fragmentados, y de superficies muy pequeñas (Plata et al., 2010).

4. Por último, se aplicó una técnica de asignación multiobjetivo (MOLA, MultiObjective Land Allocation), donde los tres objetivos entran a competir por el espacio asignado como potencialmente urbanizable, asignándose en función de una demanda de suelo, es decir, se tiene en cuenta el área máxima requerida por objetivo. Esto nos llevó a la obtención de un mapa final con la distribución de los tres objetivos: el uso residencial, comercial e industrial (figura 2).

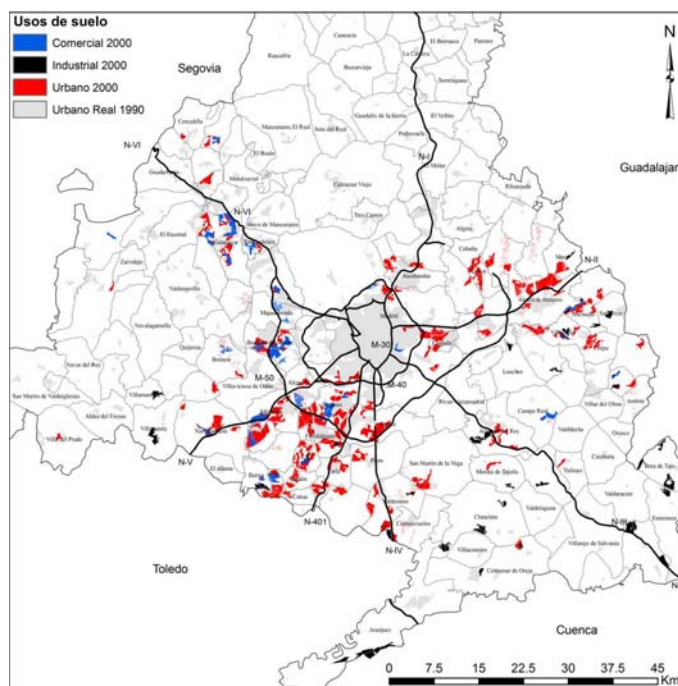


Figura 2. Resultados del modelo de asignación óptima de nuevos desarrollos urbanos para el año 2000. Fuente: Plata et al. (2010).

2.2. Modelización de las variables y obtención de los nuevos resultados de asignación óptima

Este trabajo se centra en la variación de los modelos practicados para las variables de entrada y las alteraciones que ocasiona en las diferentes fases o resultados intermedios del modelo. Antes de proseguir con la metodología propuesta, intentaremos explicar con detalle lo que se define en esta clase de modelos espaciales basados en EMC y SIG la **modelización de la variable**. Se trata de la forma en la que ha sido tratada para representar el factor a incorporar en la EMC. Por ejemplo, si decidimos que una variable a incluir en nuestro modelo es la accesibilidad a núcleos urbanos, la forma en la que se elaboraría el factor podría ser un cálculo de distancia euclidiana a cada uno de los núcleos urbanos existentes en el área de estudio. Sin embargo, esta modelización de la variable para convertirla en factor podría contemplarse de alguna otra forma. En este caso, partiendo de la misma variable, se podría haber determinado la distancia a los núcleos existentes en el área de estudio teniendo en cuenta la cantidad de población de los mismos, y así otorgar un peso mayor a los núcleos intermedios y menor a los núcleos mayores y más pequeños, de tal forma que se intente fomentar el desarrollo urbano de zonas todavía no saturadas y, a la vez, intentar preservar de la urbanización aquellas zonas potencialmente rurales.

Siguiendo este principio, en este trabajo se seleccionaron 4 factores de los enumerados en la tabla 1: dos dentro del grupo ambiental (usos del suelo y lejanía a hidrografía) y otros dos del grupo económico (accesibilidad a carreteras y a zonas urbanas preexistentes). Se han elegido estos por ser representativos de los diferentes factores, no incluyéndose ninguno de los factores sociales debido a la falta de flexibilidad a la hora de su posible variación en la modelización.

Estas variaciones se han llevado a cabo de la siguiente forma:

a.- **Usos del suelo.** En el modelo original se había tenido en cuenta para la ponderación de sus pesos la diferencia de productividad agraria en la región madrileña. Así, se realizó una zonificación del área de estudio clasificando las zonas de mayor productividad agraria (usos agrícolas y pastizales naturales) y las de mayor valor ambiental (bosques), utilizando para ello los datos del censo agrario a nivel de unidades territoriales (NUTS) (Plata et al., 2010). En esta ocasión se eliminó esta diferenciación según la productividad agraria, calculándose la media aritmética para los diferentes pesos asignados a cada uso del suelo (en función del NUT) y se aplicó ese valor medio al uso del suelo correspondiente en toda la zona de estudio. Para convertir los pesos de “aptitud para la agricultura” a “deseabilidad para urbanizar” era necesario invertir la escala, de manera que los pesos altos (buenos para agricultura) pasaran a ser bajos (malos para urbanizar). Esto se hizo restando cada peso al peso más alto y utilizando el valor resultante. En la figura 3 podemos observar cómo afecta esta nueva modelación al contrastarla con el original (aunque esta figura es uno de los resultados obtenidos lo destacamos aquí para ilustrar mejor el cambio en la modelación).

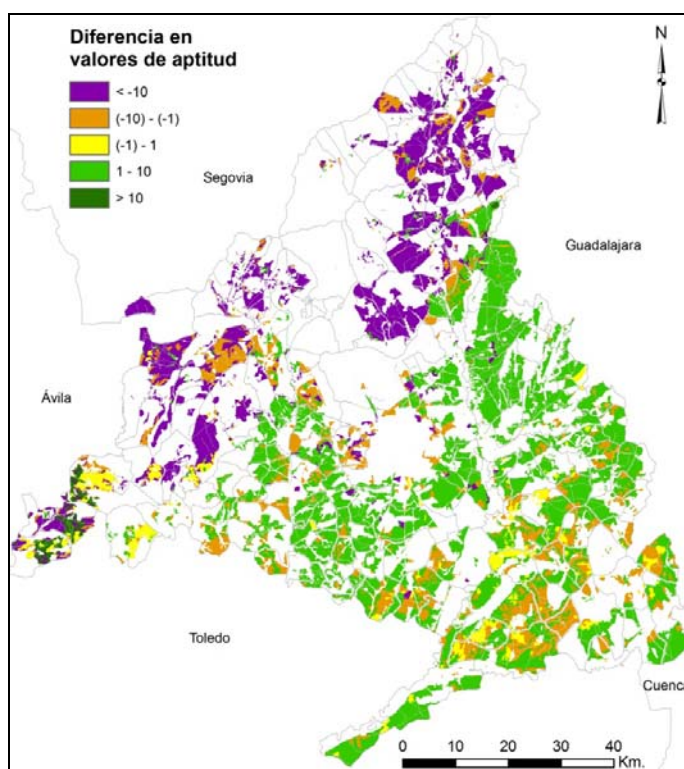


Figura 3. Mapa del factor usos de suelo. Diferencia de los valores de aptitud del mapa original y del mapa con las modificaciones descritas. Fuente: elaboración propia.

b.- **Lejanía a cursos de agua;** En el modelo original se analizaron las distancias a todos los cursos de agua existentes en la Comunidad de Madrid. A la hora de modificar esta variable se tomó en cuenta los diferentes tipos de cauces, concretamente se distinguió entre “ríos” y arroyos” y eliminando de este factor modificado, aquellos cursos menores a la categoría “arroyos” como cursos de agua no permanentes, etc. Se ponderaron para incidir más en la lejanía a los cursos de agua más importantes (ríos).

c.- **Accesibilidad a carreteras;** En este caso se optó, en el modelo original, por valorar las distancias a las carreteras sin distinción de ningún tipo, cuestión que sí se tuvo en cuenta para la variación de este factor. Así, se introdujo una ponderación por máxima velocidad permitida en cada carretera que no existía en el modelo original. Para ello se clasificaron los tramos de carretera en cuatro clases: “0 y 50”, “90”, “100” y “120” (valores de la velocidad máxima permitida expresada en km/h.). Se calcularon las cuatro capas de distancias y se multiplicó cada una de ellas por un peso diferente en función de la facilidad de acceso, mayor para las autovías y carreteras principales y menor para las carreteras de tipo local (0,14 para “0 y 50”, 0,25 para “90”, 0,28 para “100” y 0,33 para “120”). La suma de los cuatro mapas y su posterior normalización nos dio como resultado la variable modificada.

d.- **Accesibilidad a núcleos urbanos**; Este factor fue modelizado originalmente asignando distintos pesos a los núcleos en función de su tamaño poblacional. En el cambio de modelización se eliminó esta particularidad. Así, a partir de la capa inicial, se obtuvo el pertinente mapa de distancias a los núcleos urbanos.

Una vez obtenidos los nuevos factores, se ejecutó nuevamente el modelo para analizar la sensibilidad del mismo ante estas variaciones. Este proceso se realizó mediante el método "One-at-a-time" (uno cada vez). Es decir, en cada ejecución del modelo se introdujo sólo uno de los factores modificados en lugar del original. Como en este caso se modificaron cuatro, se obtuvieron cuatro nuevos resultados a comparar con el resultado del modelo original.

La *figura 4* ilustra el modelo objeto del AS, así como en qué fases del mismo se han realizado las observaciones para determinar su estabilidad. Se pueden observar distintos ejemplos de los mapas que resultaron de los análisis en cada momento del proceso. En esta figura, las formas que no están sombreadas simbolizan el proceso original del modelo; por otro lado, las que están sombreadas en un tono gris son las que simbolizan el modelo al que se le ha introducido la modificación en una de las variables de entrada. Exclusivamente para este AS se ha incorporado una variante al modelo original (llamado en esta figura, *Selección*). Lo que se propuso fue utilizar la técnica MOLA para obtener de cada uso, por separado, su demanda de suelo, obteniendo así un mapa exclusivo para cada objetivo. Con esto se persiguió eliminar el efecto de competencia entre objetivos propio de estas técnicas. En cada paso se ha nombrado y puesto entre corchetes los diferentes apartados de los que consta el modelo.

Como se mencionó anteriormente pretendíamos analizar el impacto, tanto en el resultado final, como en los resultados intermedios más relevantes, para comprobar si el efecto era lineal y progresivo. Dada las características del modelo era posible comprobar la posible incidencia de la variación introducida en tres planos o fases diferentes, más la variante añadida:

1. En primer lugar se valoraron las diferencias entre el mapa de los valores normalizados¹ de cada factor original y el modificado (*Mapas de Partida* de la *figura 4*).
2. Siguiendo el procedimiento habitual de la sumatoria lineal ponderada, el siguiente resultado intermedio obtenido en nuestro modelo sería el mapa de adecuación final para cada tipo de uso en función de todos los factores y restricciones contemplados en el estudio. Así, es posible realizar una valoración de la incidencia que la modificación de uno de los factores del modelo podía tener en los resultados (*Mapas Resultado Intermedio* de la *figura 4*).
3. Según el procedimiento descrito en el apartado 2.1, el resultado final se obtuvo mediante la aplicación de un análisis multiobjetivo en el que se integraban los mapas de las mejores parcelas para cada uso y que competían finalmente por localizarse en el territorio (*Mapas Resultado Final* de la *figura 4*).
4. Por último, se introdujo la variante con el objetivo de observar las repercusiones que tenían las distintas modelizaciones en cada objetivo por separado. Esto nos pareció interesante debido a que en una técnica de asignación multiobjetivo, los diferentes objetivos entran en competencia directa por el espacio libre por construir. Y, de la forma planteada, se eliminó esa competencia pudiendo observar el comportamiento de cada uso de manera individual (residencial, comercial e industrial) (*Mapas Variante Resultado* en *figura 4*).

¹ Los *mapas de valores normalizados* son aquellos que resultan después de generar cualquier variable de entrada y normalizarla a la escala, en este caso, 0 a 255.

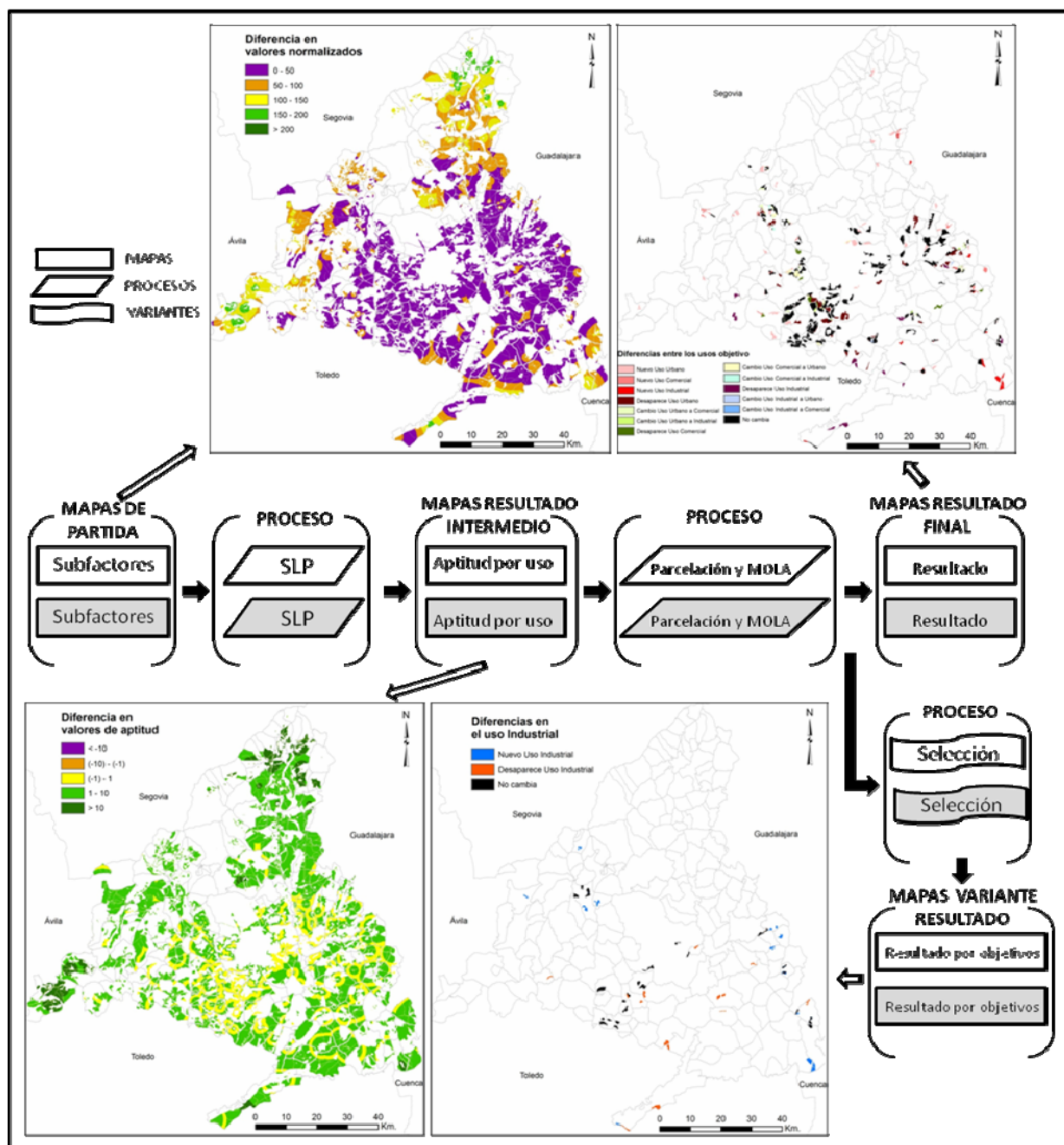


Figura 4. Esquema del modelo destacando las fases donde se ha realizado el análisis de sensibilidad. Fuente: elaboración propia.

Los **métodos de comparación** entre los resultados originales y los obtenidos con la modificación de los resultados necesariamente tenía que ser diferente, pues en las dos primeras fases -Mapas de partida y Mapas Resultado Intermedio en figura 4- se obtienen unos mapas de tipo cuantitativo (con valores entre 0 y 255) y en la tercera y última fase se obtienen mapas de tipo cualitativo (de parcelas) -Mapas Resultado Final y Mapas Variante Resultado en figura 4-.

Así, para los dos primeros procedimientos se realizó una simple resta de mapas y se calculó un índice (S) de diferencia media por pixel (en valores absolutos), basado en el propuesto por Lodwick et al. (1990) para medir sensibilidad en atributos. Este índice se calculó como:

$$S = [\text{suma } (| \text{'Xi de capa original'} - \text{'Xi de capa modificada'} |)] / \text{número total de píxeles}]$$

Dónde:

S es la Diferencia Media entre los Valores de Aptitud (DMVA) que existe entre el mapa original y el mapa modificado

Xi es el valor de aptitud en el píxel i

Por otro lado, aprovechando la flexibilidad del entorno raster en el que se lleva a cabo el modelo, este análisis se verá completado con la elaboración de un histograma de frecuencias que nos proporcione información sobre cómo es la distribución de las diferencias por píxel entre el mapa de aptitud original y el modificado para cada factor (mapas de partida) y del mapa de adecuación final original y el modificado (mapa resultado intermedio). Este dato global se podrá analizar espacialmente elaborando un mapa de distribución de dichas diferencias.

En los dos últimos casos, tratándose de valores cualitativos, se utilizó el conocido índice Kappa (K) (Cohen, 1986), proporcionándonos un dato de similitud (este índice nos indica las coincidencias, píxel a píxel, que existentes entre los mapas sin tener en cuenta lo que se acierta por azar) y no de variación (como expresa el índice S), por lo que se le restó a 1 (valor máximo alcanzable) el valor obtenido del índice Kappa. Esto se hizo para, aun cuando no son comparables estos índices, sí ser capaces de distinguir si existe una tendencia lineal, a lo largo del modelo, debido a las modificaciones introducidas.

3. RESULTADOS

Para analizar los resultados seguiremos la secuencia expuesta en el apartado de metodología, de tal forma que iremos percibiendo qué efectos tuvieron los cambios introducidos desde el principio del proceso de ejecución del modelo hasta el final del mismo. En general, ya podemos adelantar que no se aprecia una sintonía o tendencia lineal clara a la luz de los datos que se van obteniendo en la secuencia. También hemos de recordar que en el modelo se diferencia entre tres usos distintos (residencial, industrial y comercial), por lo que es posible analizar el efecto individual en cada uno de ellos.

En primer lugar, nos detendremos en los histogramas de frecuencia elaborados en las **dos primeras fases** contempladas en el estudio. Si observamos la figura 5, la conclusión a la que podemos llegar es que, en general, el impacto de la modificación introducida no es muy notable, pues la mayor concentración de frecuencias se da en los valores más bajos, disminuyendo el número de casos a medida que es mayor la diferencia en aptitud (aunque algo menos claro, en los *usos de suelo*, siguen predominando los valores bajos). Tanto en los mapas que representan las diferencias entre el factor original y el modelado diferente (mapas de partida), y los que representan los mapas de adecuación finales originales y los modificados (tanto para uso residencial, industrial y o comercial), aproximadamente el 50% de los píxeles están comprendidos en un rango entre 0 y 7 valores de diferencia de aptitud, lo que representa entre el 6% y 18% del máximo alcanzable de diferencias de aptitud.

Tratándose de un modelo espacial, resulta interesante realizar un análisis que permita comprobar dónde se acumulan las mayores diferencias, es decir, qué lugares del territorio objeto de estudio son más sensibles a las modificaciones planteadas en este análisis y si el efecto permanece constante a lo largo de las siguientes fases de ejecución del modelo. En la figura 6 aparecen los dos casos más representativos: *distancia a carreteras* (figura 6a y 6b) y *lejanía a cursos de agua* (figura 6c y 6d). Así, en la figura 6a se aprecia como las diferencias van creciendo a medida que nos alejamos del centro de la Comunidad de Madrid, acumulándose de manera más evidente en el suroeste de la región. Esto se explica gracias a varios elementos: en primer lugar, la diferencia de valor en el peso asignado a las carreteras que ahí predominan (las de velocidades de 90 km/h); unido a esto, la lejanía a las carreteras con los mayores pesos asignados (carreteras de 120 km/h); y, por último, la concentración en poco espacio de esas carreteras. En el mapa resultado intermedio para el uso comercial (figura 6b), se sigue apreciando ese efecto, concentrándose las mayores diferencias en el sector suroeste. Aunque, considerando que el valor máximo de diferencia de aptitud es de 40 y que el máximo de aptitud para el mapa de adecuación original es de 197, no se cree relevante esta concentración. En el caso del factor *lejanía a cursos de agua* (figura 6c), las mayores diferencias entre el factor original y el modelado de manera diferente se dejan notar nuevamente en el suroeste y sur de la Comunidad de Madrid. Esto ocurre de manera similar en el mapa de adecuación final para uso residencial del mismo factor. Este hecho parece ser debido a la concentración en estas zonas de los cauces eliminados en el modelado, provocando las mayores

diferencias en valores de aptitud. Sin embargo, no podemos considerar que éstas sean realmente significativas, pues la diferencia máxima es de 20 valores de aptitud, frente a un máximo de valor de aptitud que presentaba el mapa de adecuación original de 207.

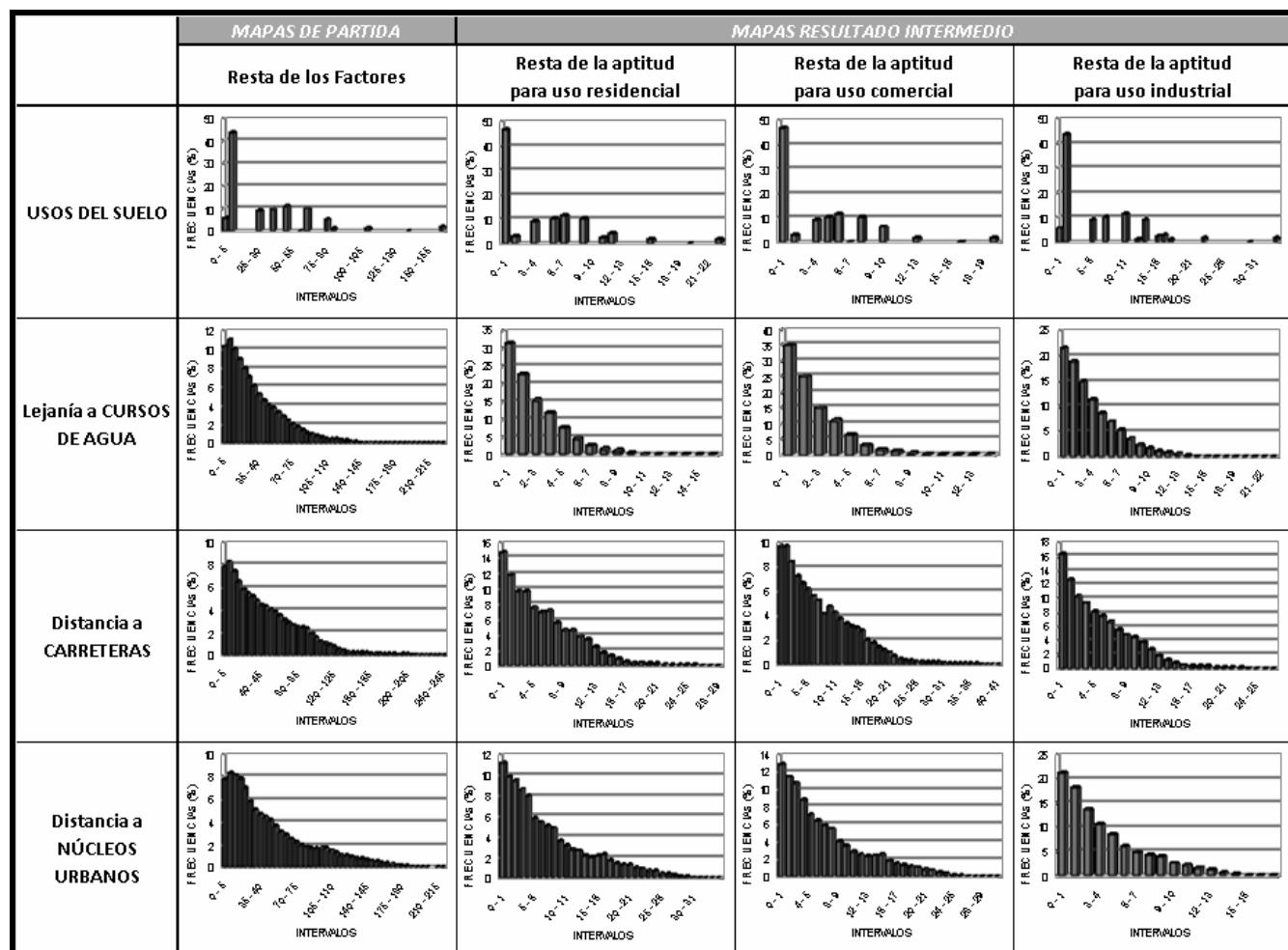


Figura 5. Resumen de los histogramas de frecuencia de los mapas comparativos de partida y resultado intermedio.

Fuente: elaboración propia.

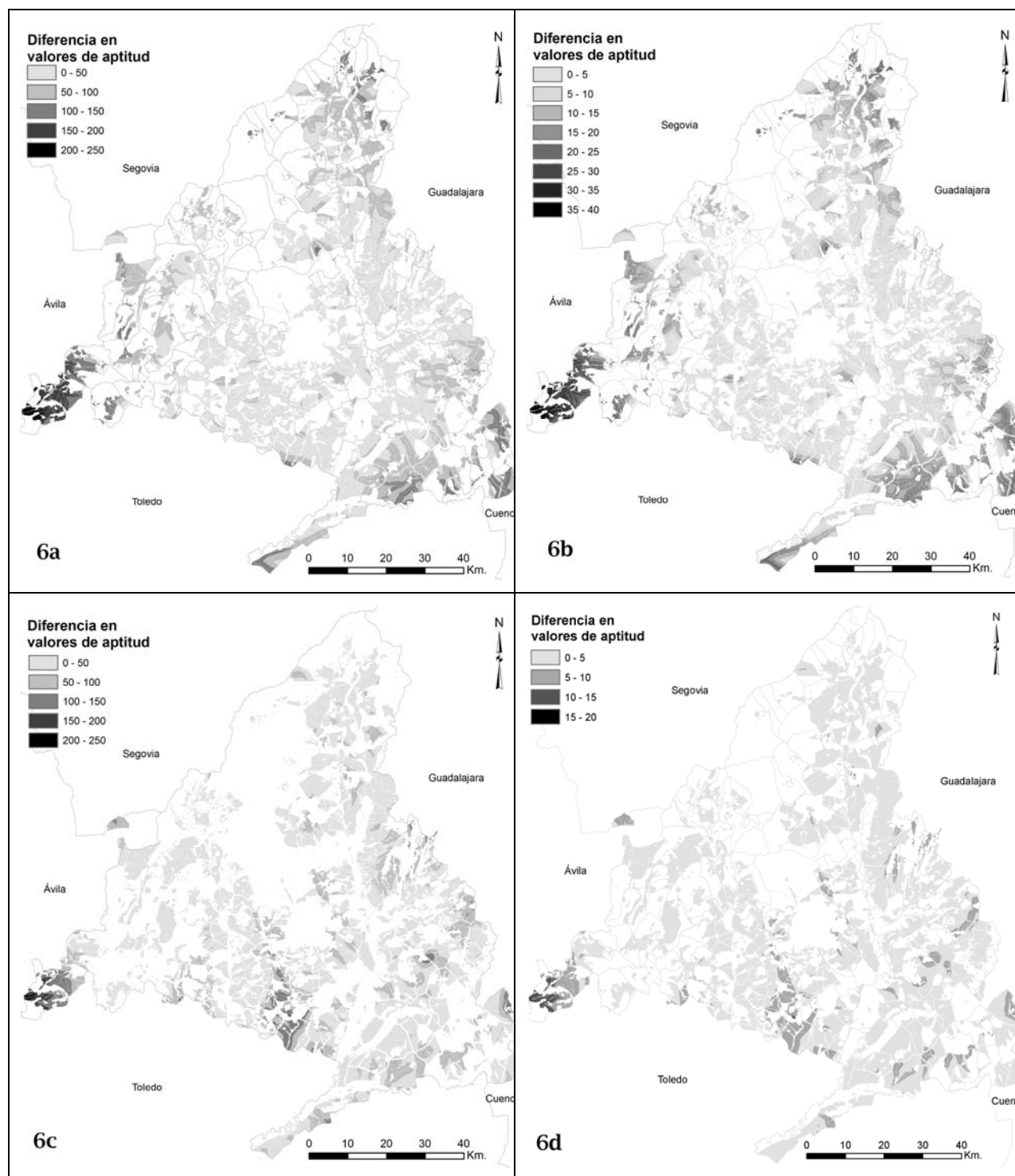


Figura 6. a) Distribución espacial de las diferencias entre el factor *distancia a carreteras* original (sin ponderar por jerarquía de las vías) y el modificado (con ponderación según tipo de vía); b) Distribución espacial de las diferencias entre el mapa de adecuación final original para el uso comercial y el resultante de introducir el factor *distancia a carreteras* modificado; c) Distribución espacial de las diferencias entre el factor *lejanía a cursos de agua* original (sin ponderar por tipo de curso de agua) y el modificado (con ponderación según tipo de curso); d) Distribución espacial de las diferencias entre el mapa de adecuación final original para el uso residencial y el resultante de introducir el factor *lejanía a cursos de agua* modificado. Fuente: elaboración propia.

Si atendemos a los resultados del índice S y el índice Kappa, ya en las tres fases de ejecución del modelo (tabla 2) se observa que son los factores *distancia a carreteras* y *distancia a núcleos urbanos* los que son más sensibles a la modificación planteada en su modelación y que, además, presentan mayor repercusión en los resultados intermedios (FASE 2, mapas de aptitud). Los otros dos factores presentan incidencias menores en los resultados intermedios, pero en el caso de los resultados finales (FASE 3 y VARIANTE), no se observa el mismo comportamiento. Si nos centramos en la FASE 1 (tabla 2), podemos observar que, en general, la repercusión de la modificación introducida en el factor *distancia a carreteras* (46,97 DMVA), ocasiona mayores repercusiones en conjunto en la obtención de los mapas de aptitud (FASE 2) con una media de los índices S de 6,26. Sin embargo, a nivel individual de uso simulado, observamos que el residencial está más influido por la modelación de la *distancia a núcleos urbanos* (7,48 DMVA). Por otra parte, en el caso de la aptitud para ubicar lo industrial, es la modelación de los *usos del suelo* la que más influye en las fases intermedias y finales (6,42 en la FASE 2 y 0,45 en la VARIANTE), a pesar de ser el factor que menos se ha modificado presenta al cambio en la modificación de su modelación (30,56 DMVA). Por otro lado, si nos fijamos en los datos de media de estos mapas, observamos que, efectivamente, sí tiende a aumentar el valor conforme las diferencias introducidas al principio son mayores (se mantiene la relación de menos a más en los *usos de suelo*, *distancia a núcleos urbanos* y *distancia a carreteras*: 30,56 – 4,29; 46,72 – 5,92; 46,97 – 6,26 DMVA, como cabría esperar).

Caso aparte es el de la *distancia a los cursos de agua*. En los análisis realizados, se puede observar que tiene un comportamiento totalmente distinto al resto de factores estudiados, registrando unos valores bastante más bajos que el resto, aun cuando su valor (34,23 DMVA) es mayor que el del factor *usos del suelo*.

Tabla 2: Resultado del análisis de sensibilidad en las tres fases de ejecución y para los tres usos urbanos analizados (residencial, R; comercial, C; e industrial, I).

	Índice S del factor	Índice S de la aptitud para ubicar lo residencial	Índice S de la aptitud para ubicar lo comercial	Índice S de la aptitud para ubicar lo industrial	Media de los índices S	1 – Kappa. Resultado MOLA	1 – Kappa. Resultado MOLA, uso residencial	1 – Kappa. Resultado MOLA, uso comercial	1 – Kappa. Resultado MOLA, uso industrial
USOS DEL SUELO	30,56	4,28	3,67	6,42	4,79	0,25	0,19	0,34	0,45
Lejanía a CURSOS DE AGUA	34,23	2,40	2,05	3,42	2,62	0,32	0,28	0,35	0,42
Distancia a CARRETERAS	46,97	5,64	7,99	5,17	6,26	0,27	0,18	0,35	0,30
Distancia a NÚCLEOS URBANOS	46,72	7,48	6,54	3,74	5,92	0,31	0,24	0,42	0,35
	FASE 1	FASE 2				FASE 3	VARIANTE		

Respecto a los datos de los mapas de tipo cualitativo (parcelas) medidos con el índice Kappa, cabe recordar que en la tabla de resultados se ha expresado como $1 - K$, para poder representar las diferencias existentes entre las capas, de la misma forma que lo hace el índice S para las capas de datos cuantitativos.

Se puede apreciar que para el caso de los productos finales del modelo (los realizados a partir del MOLA, FASE 3) los valores elaborados son bastante próximos, es decir, los cambios efectuados en cada repetición del modelo han tenido un impacto parecido en el producto final. Se corresponde una incidencia menor de la modificación del factor *usos de suelo* con un menor valor de la expresión $1 - K$ (0,25); y, por otro lado, la producida por la modificación en la modelización de la *distancia a carreteras* se aprecia que hace ascender el

valor de $1 - K$ (0,27). En el caso de la *distancia a los núcleos urbanos* esa relación no se cumple del todo, sí es mayor que el primer factor (*usos de suelo*) pero se podía prever que tuviese un valor mayor que el segundo (*lejanía a cursos de agua*), ya que en las diferencias de los mapas de entrada el valor del índice S era superior en el primero.

Se vuelve a ver que el efecto de la modificación del factor *distancia a cursos de agua* (0,32) tiene un comportamiento que se diferencia del resto de factores (mayor cambio en la entrada del modelo, mayor cambio en la salida). Esto llega a hacer que sea el factor que obtiene una mayor diferencia entre el resultado final de modelo ($1 - K$ Resultado MOLA) y la entrada del mismo (Índice S del factor).

Con respecto a la variante introducida (la asignación de cada uno de los usos por separado), se distingue lo siguiente: Los resultados no tienen una relación directa, es decir, el hecho de que se introdujera una variación menor en el factor no conlleva necesariamente que el valor del $1 - K$ en cada uso sea menor que en los otros factores (por ejemplo: *usos de suelo* tiene un valor en la FASE 1 de 30,56 d.m.v.a. y en la VARIANTE de 0,19 para residencia, 0,34 para comercial y 0,45 para industrial; y *distancia a carreteras*, tiene en la FASE 1, 46,97 d.m.v.a. y en la VARIANTE, 0,18 para residencia, 0,35 para comercial y 0,30 para industrial).

CONCLUSIONES

Como primera conclusión del presente trabajo hemos de resaltar que es posible plantear una metodología de validación complementaria y sencilla que permita otorgar cierta confiabilidad a los resultados obtenidos en un modelo espacial de asignación de usos del suelo basado en SIG y técnicas de EMC. Dicha metodología no requiere de muchos cálculos que demanden excesiva carga computacional o tiempo de ejecución, y se pueden llevar a cabo con las herramientas habitualmente disponibles en un SIG. Esto puede contribuir, por tanto, a que el investigador no se desanime a la hora de realizar este tipo de procesos tan necesarios en simulaciones como las evaluadas en este ensayo, que tratan sobre propuestas de planificación futura en las que deberían estar implicados agentes sociales, políticos, expertos y los mismos ciudadanos que habitarán esos territorios. Por tanto, resulta imprescindible para llegar a soluciones de consenso que los resultados de estos modelos sean fiables.

De manera general podemos decir que los análisis realizados en este caso muestran que los resultados del modelo de localización de suelo residencial, industrial y comercial resultan bastante robustos. A pesar de que en algunos casos las variaciones en la modelación de algunas variables son importantes, la repercusión en los resultados intermedios y finales no han sido relevantes. Lo que no se ha podido demostrar, en todo caso, es que el efecto sea lineal y progresivo en las diferentes fases de ejecución del modelo. Así, el factor *distancia a cursos de agua* ha mostrado un comportamiento anómalo en comparación con el resto de factores, mostrando valores bajos de repercusión en los resultados de las fases intermedias (FASE 2) y registrando los mayores valores en las fases finales (FASE 3 y VARIANTE).

Por otro lado, consideramos imprescindible que el análisis de los resultados de este tipo de procedimientos no se ciñan a unos datos globales para todo el área de estudio (índice S, índice Kappa...) y nos permitan valorar de alguna manera las diferencias en el espacio del impacto producido por las modificaciones introducidas en el modelo. La cartografía aquí presentada es una primera propuesta, pero se ha de seguir indagando en otras posibilidades.

No obstante, en el modelo concreto objeto de estudio los resultados no han sido del todo satisfactorios; todavía son complejos de interpretar bien. Así, pensamos que se debe seguir trabajando, tanto en la metodología, como en los procedimientos de análisis de resultados propuestos y profundizar en los matices de algunos resultados. Además, consideramos indispensable complementar este análisis con los otros mencionados en la introducción, especialmente con los relacionados con la repercusión que puede tener en los resultados la modificación de los pesos otorgados a los distintos factores, o la utilización de otras técnicas de EMC.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación "SIMURBAN: Análisis y simulación prospectiva mediante Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) del crecimiento urbano actual. Evaluación de su sostenibilidad", financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC España) a través de la convocatoria 2006 de proyectos del Plan nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación 2004-2007, Programa nacional de Ciencias Sociales, Económicas y Jurídicas (referencia SEJ2007-66608-C04- 00/ GEOG).

Queremos agradecer particularmente al Dr. Javier Montero Serrano sus observaciones y sugerencias durante la elaboración de esta comunicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baja, S., Chapman, D. M., Dragovich, D. (2007). Spatial based compromise programming for multiple criteria decision making in land use planning, *Environmental Modelling Assessment*, 12, pp. 171-184.

Chang, N. B., Parvathinathan, G., Breeden, J. B. (2008). Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region, *Journal of Environmental Management*, 87, pp. 139-153.

Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* Vol.20, No.1, p. 37-46.

Crosetto, M. y Tarantola, S. (2001). "Uncertainty and sensitivity analysis: tools for GIS-based model implementation", *International Journal of Geographical Information Science*, 15 (5), pp.415-437.

Crosetto, M.; Moreno, J.A. y Crippa, B. (2001). "Uncertainty propagation in models driven by remotely sensed data", *Remote Sensing of Environment*, 76 (3), pp.373-437.

Crosetto, M., Crosetto, F. y Tarantola, S. (2002). "Optimised resource allocation for GIS-based model implementation", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68 (3), pp.225-232.

Franco S. y Bosque, J. (1999). "Procedimiento para la obtención de parcelas de adecuación en imágenes raster", *I Reunión de usuarios Españoles de Idrisi*, Alcalá de Henares, España.

Geneletti, D. y van Duren, I. (2008). Protected area zoning for conservation and use: A combination of spatial multicriteria and multiobjective evaluation, *Landscape and Urban Planning*, 85, pp. 97-110.

Gómez, M. y Barredo, J. (2005). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Madrid, Ed. RA-MA.

Gómez, M. y Bosque, J. (2004). Aplicación de análisis de incertidumbre como método de validación y control del riesgo en la toma de decisiones, *Geofocus*, 4, p.179-208.

Lodwick, W., Monson, W. and Svoboda, L. (1990) Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographic information systems: suitability analysis. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4 (4), p. 413-428.

Plata, W., Gómez, M., Bosque, J. (2010). Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica, *Geofocus* 10, p. 103-134.

Saltelli, A., Tarantola, S., Chan, K. (1999a). "A quantitative model independent method for global sensitivity analysis of model output", *Technometrics*, 41, pp. 39-56.

Saltelli, A.; Tarantola, S. y Chan, K. (1999b). "A role for sensitivity analysis in presenting the results from MCDA studies to decision makers", *Journal of multi-criteria decision analysis*, 8 (3), pp.139-145.

Saltelli, A.; Chan, K. y Scott, E. (2000). *Sensitivity Analysis*. Chichester, John Wiley & Sons, LTD